

# Niewidzialne rezerwy nośności w opakowaniach z tektury falistej

## Invisible strength reserves in corrugated board packaging

TOMASZ GARBOWSKI, KAROL NOWAK

DOI: 10.15199/54.2026.6.2

Opakowania z tektury falistej projektowane są najczęściej z odpowiednim zapasem bezpieczeństwa, wynikającym ze zmienności materiału, niepewności warunków logistycznych oraz konieczności ochrony produktu. W praktyce część tego zapasu jest niezbędna, jednak część może stanowić niewykorzystaną rezerwę nośności, prowadzącą do nadmiernego zużycia surowców oraz nieoptymalnych kosztów produkcji. Oznacza to, że wiele konstrukcji posiada ukryty potencjał, który może zostać lepiej rozpoznany i wykorzystany, bez pogarszania jakości użytkowej. W artykule omówiono główne źródła niewidzialnych rezerw nośności w opakowaniach z tektury falistej, obejmujące: właściwości materiałowe, geometrię konstrukcji, konserwatywne założenia projektowe oraz rzeczywiste warunki magazynowania i transportu. Przedstawiono znaczenie takich czynników jak: przewymiarowane gramatury papierów, niedostateczne wykorzystanie sztywności naroży, nieoptymalny układ klap i zawyżone scenariusze obciążeń logistycznych. Wskazano nowoczesne metody identyfikacji rezerw nośności, w tym: badania porównawcze, modelowanie numeryczne, analizę danych eksploatacyjnych oraz narzędzia sztucznej inteligencji. Podkreślono, że świadome zarządzanie zapasem bezpieczeństwa może prowadzić do redukcji masy opakowań, ograniczenia kosztów oraz poprawy efektywności środowiskowej, bez zwiększania ryzyka uszkodzeń produktu.

**Słowa kluczowe:** tektura falista, opakowania, nośność, zapas bezpieczeństwa, optymalizacja, BCT, redukcja masy, projektowanie opakowań

Corrugated board packaging is commonly designed with an appropriate safety margin resulting from material variability, uncertainty of logistical conditions, and the need to protect the packed product. In practice, part of this margin is necessary, while another part may represent unused strength reserves, leading to excessive raw-material consumption and non-optimal production costs. This means that many packaging structures contain hidden potential that may be better identified and utilized without compromising

functional performance. This paper discusses the main sources of invisible strength reserves in corrugated board packaging, including material properties, structural geometry, conservative design assumptions, and actual storage and transport conditions. Particular attention is given to oversized paper grammages, insufficient use of corner stiffness, non-optimal flap layouts, and overestimated loading scenarios. Modern methods for identifying such reserves are presented, including comparative testing, numerical modeling, operational data analysis, and artificial intelligence tools. It is shown that conscious management of safety margins may lead to packaging weight reduction, lower costs, and improved environmental efficiency without increasing the risk of product damage.

**Keywords:** corrugated board, packaging, strength, safety margin, optimization, BCT, lightweighting, packaging design

### Wprowadzenie

Opakowania z tektury falistej odgrywają kluczową rolę w nowoczesnych systemach transportu, magazynowania i sprzedaży. Chronią produkty, umożliwiają piętrzenie jednostek ładunkowych, wspierają logistykę handlu internetowego oraz stanowią jeden z filarów gospodarki obiegu zamkniętego, dzięki wysokiemu potencjałowi recyklingu. Jednocześnie są wyrobem masowym, produkowanym w ogromnych ilościach, co sprawia, że nawet niewielkie zmiany materiałowe lub konstrukcyjne mogą powodować znaczące skutki ekonomiczne i środowiskowe. Znaczenie właściwego opisu sztywności zastępczej tektury falistej oraz jego wpływu na projektowanie konstrukcji podkreślono m.in. w pracy Biancoliniego [1].

Projektowanie opakowań odbywa się zazwyczaj z zastosowaniem odpowiednich zapasów bezpieczeństwa. Jest to podejście naturalne i uzasadnione. Tektura falista, jako materiał włóknisty, wykazuje zmienność parametrów, reaguje na wilgotność i temperaturę, a rzeczywiste warunki transportu oraz magazynowania nie zawsze są w pełni przewidywalne. Dodatkowo konsekwencje uszkodzenia produktu bywają

Dr hab. inż. T. Garbowski, prof. UPP (tomasz.garbowski@up.poznan.pl), Uniwersyteckie Centrum Ekomateriałów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu; inż. K. Nowak (k.nowak@wseit.edu.pl), Wyższa Szkoła Edukacji i Terapii w Poznaniu

znacznie droższe niż koszt dodatkowych gramów papieru. Z tego względu konstruktorzy często wybierają rozwiązania konserwatywne.

Problem pojawia się wtedy, gdy zapas bezpieczeństwa przestaje być świadomym narzędziem inżynierskim, a staje się trwałym nawykiem projektowym. W praktyce część opakowań może być przewymiarowana materiałowo lub konstrukcyjnie, posiadając rezerwy nośności znacznie większe niż rzeczywiście potrzebne. Rezerwy te są często niewidoczne, ponieważ nie ujawniają się w codziennej eksploatacji, a jednocześnie zwiększają zużycie surowca i koszt jednostkowy.

Współczesny rynek zmienia jednak perspektywę. Rosną ceny energii i papieru, zwiększa się presja na redukcję emisji CO<sub>2</sub>, a odbiorcy oczekują lżejszych i bardziej zrównoważonych opakowań. W takich warunkach pytanie nie brzmi już tylko „czy pudełko wytrzyma?“, lecz również „czy nie wytrzyma zbyt wiele kosztem nadmiarowego materiału?“.

Nowoczesne narzędzia, takie jak: modelowanie numeryczne, analiza danych eksploatacyjnych, monitoring logistyczny i sztuczna inteligencja, pozwalają coraz dokładniej identyfikować rzeczywiste wymagania wytrzymałościowe. Dzięki temu możliwe staje się zarządzanie zapasem bezpieczeństwa w sposób świadomy, a nie intuicyjny.

Celem artykułu jest przedstawienie źródeł niewidzialnych rezerw nośności w opakowaniach z tektury falistej oraz omówienie metod ich identyfikacji i racjonalnego wykorzystania. W wielu przypadkach najtańszym wzmocnieniem opakowania nie jest dodanie papieru, lecz lepsze zrozumienie tego, co już w nim pracuje.

### Czym jest rezerwa nośności opakowania?

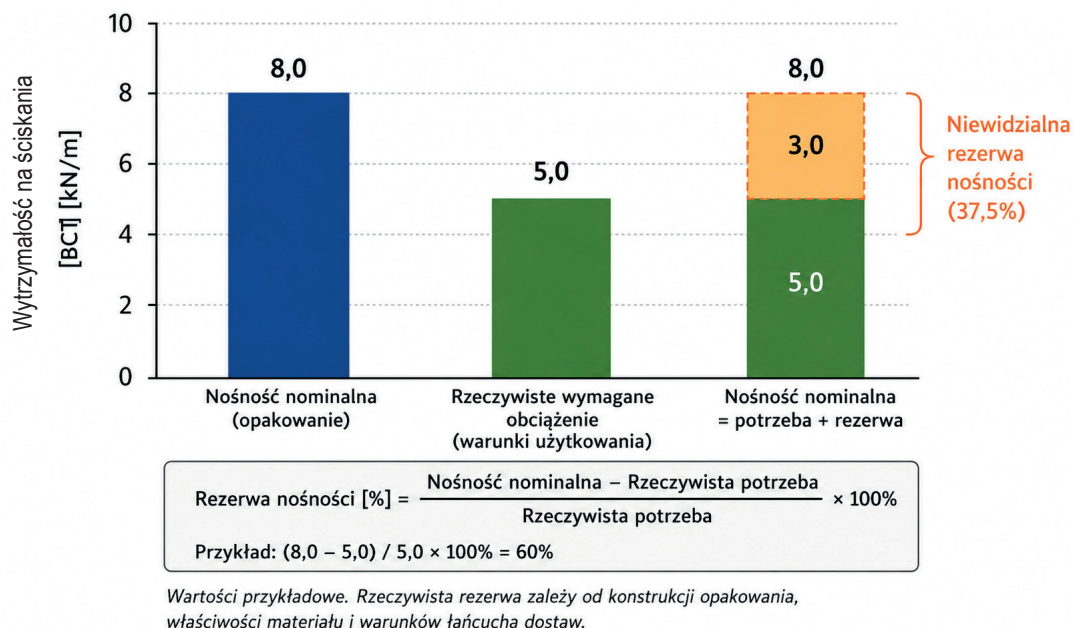
W języku inżynierskim rezerwa nośności oznacza różnicę między rzeczywistą zdolnością konstrukcji do przenoszenia obciążeń

a poziomem obciążeń występujących podczas normalnego użytkowania. Innymi słowy, jest to zapas możliwości, który pozostaje niewykorzystany w typowych warunkach eksploatacyjnych. W kontekście opakowań transportowych problem zapasu bezpieczeństwa silnie wiąże się z klasycznymi analizami wytrzymałości pudełek oraz metodami oceny BCT [5]. W przypadku opakowań z tektury falistej rezerwa ta pełni ważną funkcję ochronną, ponieważ świat logistyki rzadko bywa idealnie przewidywalny.

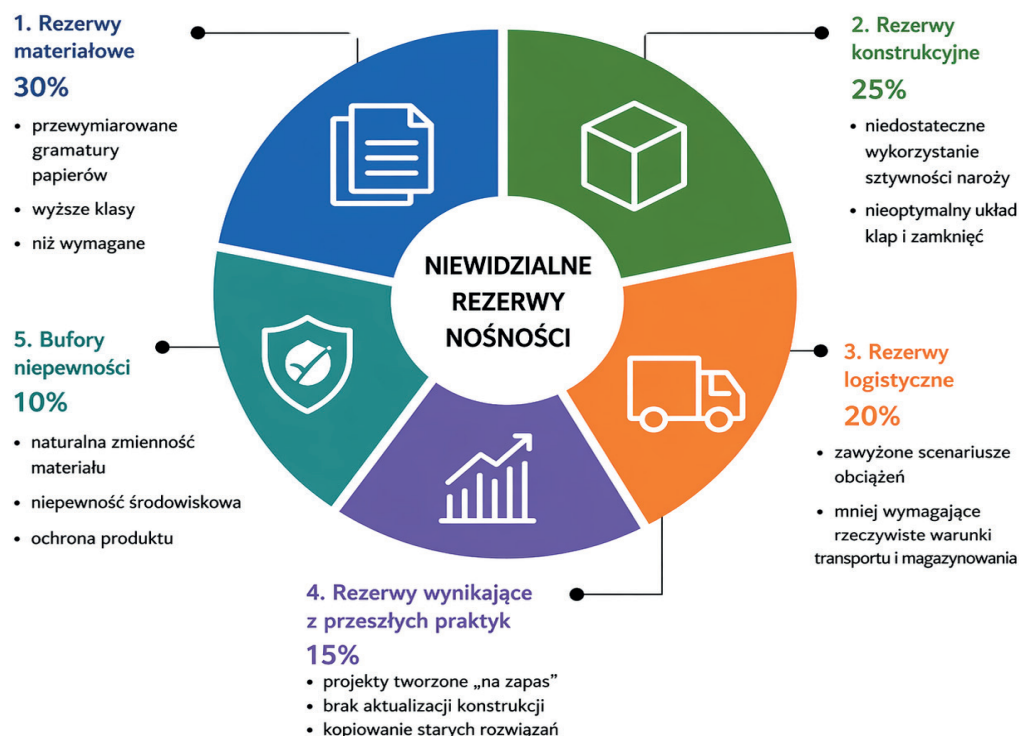
Każde pudełko projektowane jest zwykle z myślą o określonych wymaganiach: masie produktu, liczbie warstw na palecie, czasie składowania, sposobie transportu, czy odporności na przypadkowe uszkodzenia. Gdyby wszystkie te warunki były stałe i znane z pełną dokładnością, konstrukcję można byłoby dobrać bardzo precyzyjnie. W praktyce jednak występują zmienności materiałowe, błędy obsługi, sezonowe zmiany wilgotności, przeciążenia chwilowe oraz nieprzewidziane sytuacje. Rezerwa nośności jest więc ceną za bezpieczeństwo w świecie niepewności.

Warto rozróżnić **nośność nominalną** oraz **nośność rzeczywistą**. Nośność nominalna to wartość deklarowana, projektowana lub wyznaczona na podstawie testu w określonych warunkach laboratoryjnych. Nośność rzeczywista odnosi się do zachowania opakowania w konkretnym środowisku użytkowania, gdzie działają dodatkowe czynniki, takie jak wilgoć, czas obciążenia, czy nierównomierne ustawienie palety. Między tymi dwoma poziomami często pojawia się przestrzeń, w której kryje się zarówno bezpieczeństwo, jak i potencjalna nieefektywność. Schematyczne ujęcie różnicy między nośnością nominalną a rzeczywistym zapotrzebowaniem przedstawiono na rysunku 1.

Nie każda rezerwa jest zbędna. Część zapasu jest absolutnie konieczna, szczególnie w branżach wymagających wysokiej niezawodności.



Rys. 1. Rezerwa nośności jako różnica między zdolnością nominalną a rzeczywistą potrzebą użytkową



*Udziały mają charakter orientacyjny i mogą różnić się w zależności od segmentu rynku, typu opakowania oraz przyjętych założeń projektowych.*

Rys. 2. Główne źródła niewidzialnych rezerw nośności w opakowaniach z tektury falistej

wodności, takich jak: spożywcza, farmaceutyczna, elektroniczna, a także w eksporcie długodystansowym. W tych zastosowaniach koszt uszkodzenia produktu może wielokrotnie przewyższać oszczędność wynikającą z redukcji kilku gramów papieru. Rezerwa staje się wtedy polisą ubezpieczeniową wpisaną w konstrukcję pudełka.

Problem dotyczy sytuacji, w których zapas bezpieczeństwa narasta historycznie i bezrefleksyjnie. Konstrukcja mogła zostać zaprojektowana dawno temu z myślą o trudniejszych warunkach, cięższych produktach lub mniej stabilnej jakości papieru, a następnie kopiowana przez kolejne lata bez ponownej analizy. W takim przypadku opakowanie może nadal działać poprawnie, ale część jego nośności pracuje jedynie symbolicznie.

Rezerwa nośności może mieć różne źródła. Bywa ukryta w nadmiernej gramaturze papierów, w korzystnej geometrii naroży, w lepszych niż zakładano parametrach materiałowych, w zbyt ostrożnych założeniach logistycznych lub w konserwatywnych modelach obliczeniowych. Niekiedy znajduje się w samym materiale, czasem w projekcie lub w przyzwyczajeniach organizacji.

Z punktu widzenia nowoczesnego projektowania kluczowe nie jest usuwanie każdej rezerwy, lecz **zarządzanie rezerwą świadomie**. Należy wiedzieć, ile zapasu jest potrzebne, gdzie się znajduje i ile kosztuje jego utrzymanie. Wtedy decyzja o redukcji materiału lub pozostawieniu marginesu bezpieczeństwa staje się wyborem strategicznym, a nie domysłem.

Można stwierdzić, że rezerwa nośności przypomina poduszkę finansową firmy. Rozsądna daje spokój i bezpieczeństwo. Nadmierna może oznaczać zamrożony kapitał. Sztuką nie jest jej brak ani przesada, lecz właściwy poziom.

### Skąd biorą się ukryte rezerwy?

Niewidzialne rezerwy nośności nie pojawiają się przypadkowo. Są wynikiem sposobu projektowania, historii organizacji, ostrożnych założeń technologicznych oraz naturalnej tendencji przemysłu do unikania ryzyka. W wielu przypadkach powstają stopniowo, warstwa po warstwie. Główne źródła ukrytych rezerw nośności w opakowaniach z tektury falistej zestawiono na rysunku 2.

Jednym z najczęstszych źródeł rezerw są **przewymiarowane gramatury papierów**. Jeśli konstrukcja została kiedyś zaprojektowana dla mniej stabilnego surowca, starszej technologii produkcji lub trudniejszych warunków logistycznych, późniejsze poprawy jakości materiałów mogły sprawić, że pierwotny zapas stał się większy niż potrzebny. Papier pracuje wtedy poprawnie, ale część jego potencjału nigdy nie jest wykorzystywana.

Drugim ważnym czynnikiem są **konserwatywne wzory i uproszczone modele projektowe**. Wiele metod szacowania nośności opakowań opiera się na zależnościach empirycznych, które z definicji muszą być bezpieczne dla szerokiego zakresu przypadków. Taka ostrożność jest uzasadniona, lecz może prowadzić

do systematycznego zawyżania wymagań materiałowych w konkretnych zastosowaniach. Model zaprojektowany dla „średniego świata” bywa zbyt surowy dla realnego klienta.

Istotnym źródłem rezerw jest także **niepełne wykorzystanie geometrii konstrukcji**. Naroża pudełek, zagięcia, układ klap, czy współpraca ścian bocznych często wzmacniają opakowanie bardziej niż wynika to z intuicyjnej oceny. Jeśli projektant koncentruje się głównie na gramaturze papieru, może przeoczyć potencjał samej formy konstrukcyjnej.

Kolejną przyczyną są **historyczne standardy firmowe**. W wielu przedsiębiorstwach istnieją sprawdzone rozwiązania stosowane od lat: „dla tego klienta zawsze ten wariant”, „ten produkt zawsze w tej tekturze”, „na eksport zawsze podnosimy klasę”. Takie reguły często miały sens w momencie powstania, lecz po latach mogą funkcjonować bardziej jako tradycja niż jako aktualna potrzeba techniczna.

Rezerwy rodzą się również z **nadmiernie ostrożnych założeń logistycznych**. Projekt może zakładać długie magazynowanie, wysokie piętrzenie, trudny transport i wysoką wilgotność, podczas gdy rzeczywisty cykl życia produktu jest znacznie łagodniejszy. Jeśli scenariusz ekstremalny staje się standardem w każdym przypadku, opakowanie nosi ciężar cudzych obaw.

Nie można pominąć wpływu **braku informacji zwrotnej z rynku**. Jeśli producent nie analizuje systematycznie reklamacji, rzeczywistych uszkodzeń i warunków użytkowania, trudno odróżnić zapas potrzebny od zapasu przypadkowego. Wtedy najłatwiejszą strategią pozostaje „nie ruszać, skoro działa”.

Czasem rezerwy wynikają wręcz z sukcesu. Jeśli przez lata nie było problemów jakościowych, organizacja może uznać obecny poziom materiału za jedynie słuszny, nie zauważając, że część tego sukcesu wynika z nadmiarowego marginesu bezpieczeństwa.

Z perspektywy inżynierskiej ukryte rezerwy są więc mieszanką rozsądku, ostrożności i inercji. Nie są błędem samym w sobie. Problem zaczyna się wtedy, gdy nikt już nie pamięta, dlaczego powstały. Źródła rezerw nośności zestawiono w tabeli 1.

### Rezerwy materiałowe

Jednym z najbardziej oczywistych, a zarazem najtrudniejszych do racjonalnej oceny źródeł ukrytej nośności są rezerwy materiałowe. Obejmują one sytuacje, w których zastosowany surowiec posiada parametry wyższe niż rzeczywiście wymagane w danym zastosowaniu.

W praktyce oznacza to, że część papieru pracuje bardziej jako psychologiczne zabezpieczenie niż konieczny element konstrukcji.

Najczęściej spotykanym przykładem są **zawyżone gramatury papierów**. Wiele opakowań projektowanych jest według zasady ostrożności: jeśli istnieje wątpliwość, należy wybrać cięższy liner lub mocniejszy fluting. Taka decyzja bywa uzasadniona przy braku danych, lecz w skali dużej produkcji każdy dodatkowy gram na metr kwadratowy przekłada się na realne koszty surowcowe, transportowe i środowiskowe.

Kolejnym źródłem rezerwy jest **stosowanie papierów o parametrach wyższych niż potrzebne**. Dotyczy to nie tylko gramatury, ale również wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie, czy odporności powierzchniowej. Jeśli produkt nie wymaga ekstremalnych warunków logistycznych, użycie klasy premium może nie wносить proporcjonalnej wartości użytkowej.

W praktyce często występuje także **dziedziczenie specyfikacji materiałowych**. Nowe opakowanie otrzymuje ten sam skład papierów co wcześniejszy projekt, ponieważ rozwiązanie jest znane, bezpieczne i łatwe do wdrożenia. Z punktu widzenia operacyjnego to wygodne, lecz technicznie może prowadzić do kopiowania nadmiarowych parametrów na kolejne produkty.

Istotnym zagadnieniem jest również **nierównomierne wykorzystanie warstw tektury**. Badania pokazują, że nawet niewielkie imperfekcje geometryczne mogą wpływać na sztywność oraz redystrybucję naprężeń w wielowarstwowych układach tekturowych [12]. W niektórych konstrukcjach jedna z warstw linera lub flutingu może pracować znacznie intensywniej niż pozostałe. Jeśli wszystkie warstwy dobierane są z jednakowym nadmiarem, część materiału pełni rolę pasażera na pokładzie konstrukcji.

Rezerwy materiałowe mogą wynikać także z **poprawy jakości dostaw**. Jeżeli producent papieru przez lata podniósł stabilność parametrów i zmniejszył zmienność partii, dawny zapas bezpieczeństwa przewidziany na wahania jakości może okazać się większy niż obecnie potrzebny. Surowiec stał się lepszy, ale specyfikacja nie zdążyła tego zauważyć.

Warto podkreślić, że celem nie jest mechaniczne „odchudzenie za wszelką cenę”. Materiał stanowi pierwszą linię obrony opakowania, dlatego redukcja powinna wynikać z analizy danych, testów i znajomości realnego scenariusza użytkowania. Zbyt agresywne cięcia mogą szybko zamienić oszczędność w reklamację.

Tabela 1. Typowe źródła niewidzialnych rezerw nośności i ich objawy w praktyce

| Źródło rezerwy                     | Typowy objaw                                  | Potencjał oszczędności |
|------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|
| Zawyżona gramatura papierów        | Brak uszkodzeń mimo wysokiego zapasu          | Średni                 |
| Zawyżone założenia piętrzenia      | Rzeczywiste obciążenia niższe od projektowych | Wysoki                 |
| Historyczne standardy firmowe      | Powielanie dawnych specyfikacji               | Średni                 |
| Niewykorzystana geometria naroży   | Mocna konstrukcja bez optymalizacji materiału | Wysoki                 |
| Nadmiarowy margines bezpieczeństwa | Brak reklamacji przez wiele lat               | Średni                 |

Najbardziej efektywnym podejściem jest **inteligentna optymalizacja materiałowa**. Oznacza to dobór papierów adekwatnych do konkretnego zastosowania – logistyki lokalnej, eksportu, e-commerce, produktów lekkich, lecz wrażliwych. Nie każde pudełko potrzebuje zbroi. W procesie racjonalnego doboru materiału szczególnie pomocne są również modele homogenizacyjne, umożliwiające wyznaczanie efektywnych parametrów sztywności, w tym sztywności ścinania struktur falistych [11].

Nowoczesne narzędzia, takie jak: analiza danych produkcyjnych, testy porównawcze, modelowanie numeryczne, sztuczna inteligencja, pozwalają coraz precyzyjniej określać minimalny bezpieczny poziom parametrów. Dzięki temu można zmniejszać zużycie papieru bez utraty funkcjonalności.

Można metaforycznie stwierdzić, że rezerwy materiałowe to najdroższy rodzaj ciszy w opakowaniu. Papier niczego nie zgłasza, bo problemu nie ma. Pytanie tylko, czy trzeba było aż tyle papieru, aby tę ciszę kupić.

### Rezerwy konstrukcyjne

Nie każda ukryta nośność znajduje się w gramaturze papieru. Często znaczna część potencjału opakowania wynika z samej geometrii konstrukcji, sposobu składania oraz współpracy poszczególnych ścian i krawędzi. Innymi słowy, pudełko bywa mocniejsze nie dlatego, że jest cięższe, lecz dlatego, że zostało sprytnie ukształtowane.

Największe znaczenie mają zwykle **naroża opakowania**. To właśnie tam spotykają się ściany boczne, tworząc lokalne strefy podwyższonej sztywności. Naroża przejmują znaczną część obciążeń pionowych podczas piętrzenia i często pracują skuteczniej niż sugerują uproszczone modele jednowymiarowe. Dobrze zaprojektowany narożnik potrafi być cichym bohaterem całej konstrukcji.

Istotnym źródłem rezerw są także **linie zagięć i przetłoczenia**. Choć bigowanie kojarzy się głównie z ułatwieniem składania, odpowiednio zaprojektowane strefy załamań mogą porządkować pracę ścian, poprawiać stateczność lokalną i ograniczać niekontrolowane deformacje. Geometria często działa subtelnie, ale skutecznie.

Kolejnym elementem jest **układ klap górnych i dolnych**. W zależności od sposobu zamknięcia pudełka, klapy mogą wzmacniać krawędzie, stabilizować przekrój lub rozprowadzać obciążenia. W wielu konstrukcjach ten efekt jest niedoceniany, szczególnie gdy analiza skupia się wyłącznie na ścianach bocznych.

Duże znaczenie ma również **proporcja wymiarów pudła**. Testy czteropunktowego zginania potwierdzają także silny wpływ orientacji materiału na zachowanie tektury falistej [13]. Konstrukcje smukłe, szerokie, niskie lub wysokie reagują inaczej na ściskanie i wyboczenie. Niekiedy niewielka zmiana relacji długości, szerokości i wysokości daje większy efekt niż wzrost gramatury papieru. Milimetr geometrii bywa cenniejszy niż gram surowca.

Źródłem rezerw może być także **orientacja fali względem kierunku obciążeń**. Własności mechaniczne mogą być również istotnie modyfikowane przez sam kształt warstwy pofalowanej [10]. Ustawienie arkusza i przebieg fal wpływają na sztywność ścian oraz sposób deformacji pudełka. W niektórych przypadkach odpowiednia orientacja materiału pozwala lepiej wykorzystać istniejący potencjał bez zwiększania kosztu.

W praktyce spotyka się również konstrukcje, w których część geometrii została odziedziczona po dawnych wymaganiach technologicznych. Dodatkowe zakładki, szerokie strefy klejenia, nadmiarowe wzmocnienia lub zachowawcze proporcje mogły mieć kiedyś uzasadnienie, lecz dziś tworzą ukrytą nadwyżkę nośności.

Warto podkreślić, że rezerwy konstrukcyjne są szczególnie atrakcyjne ekonomicznie, ponieważ często można je wykorzystać bez zwiększania zużycia materiału. Lepsza geometria zamiast cięższego papieru to jedna z najbardziej eleganckich dróg optymalizacji. Aktualne badania wskazują, że odpowiednie kształtowanie geometrii tacek i opakowań może istotnie poprawiać ich nośność oraz efektywność materiałową [4].

Identyfikacja takich rezerw wymaga jednak narzędzi wykraczających poza intuicję. Pomocne są testy porównawcze wariantów, symulacje MES, analiza deformacji oraz dane z eksploatacji. Konstrukcja pudełka bywa bardziej inteligentna niż wygląda na rysunku technicznym. Potencjał modyfikacji geometrii fali jako źródła dodatkowych korzyści mechanicznych oraz poprawy wybranych parametrów użytkowych omówiono w [8].

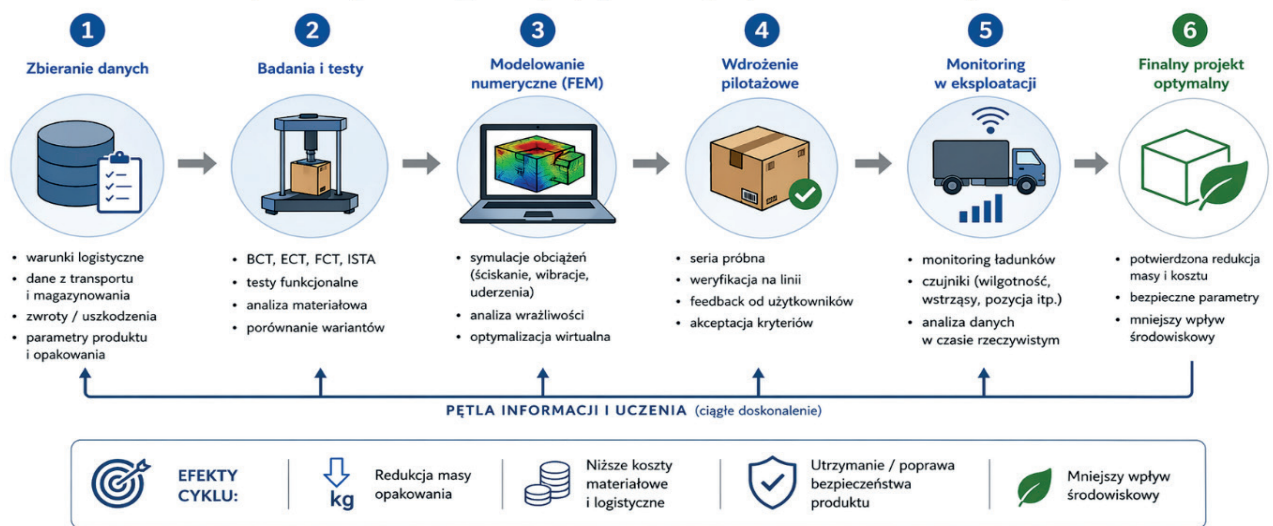
### Rezerwy logistyczne

Nie wszystkie ukryte zapasy nośności wynikają z materiału lub kształtu opakowania. Znaczna część rezerw powstaje poza fabryką, w sposobie użytkowania pudełka w realnym łańcuchu dostaw. Projektanci często muszą zakładać scenariusze ostrożne, podczas gdy rzeczywistość logistyka bywa łagodniejsza niż przewidywano. Właśnie w tej różnicy rodzą się rezerwy logistyczne.

Najczęstszym przykładem są **realne obciążenia niższe niż zakładane**. Opakowanie może być projektowane pod maksymalną masę produktu, pełne piętrzenie palet oraz niekorzystne warunki magazynowe, podczas gdy w praktyce produkt jest lżejszy, palety niższe, a składowanie krótsze. Pudełko niesie więc ciężar hipotetycznych problemów, które występują rzadko lub wcale.

Drugim źródłem rezerw jest **krótszy czas składowania**. Wiele konstrukcji dobiera się z myślą o długotrwałym magazynowaniu, aby zabezpieczyć się przed pętlaniem materiału i utratą sztywności. Tymczasem część produktów rotuje szybko i opuszcza magazyn po kilku dniach.

Znaczenie ma również **jakość paletyzacji i stabilizacja ładunku**. Dobrze ułożone warstwy, właściwe przekładki, folia stretch, narożniki ochronne i poprawne rozmieszczenie ciężaru zmniejszają lokalne przeciążenia pudełek. Jeśli projekt zakłada chaos logistycz-



Rys. 3. Cykl inteligentnej optymalizacji opakowań z tektury falistej

ny, a rzeczywistość jest uporządkowana, część zapasu pozostaje niewykorzystana.

Kolejnym czynnikiem jest **rzeczywisty transport łagodniejszy od scenariusza projektowego**. Opakowanie może być przygotowane na trudną trasę eksportową, liczne przeładunki i wysoką wilgotność, a finalnie trafia do lokalnej dystrybucji w stabilnych warunkach. To tak, jakby budować pojazd terenowy do jazdy po parkingu.

Istotne są także **różnice między klientami i kanałami sprzedaży**. Ten sam produkt może trafiać do handlu tradycyjnego, e-commerce, eksportu lub sprzedaży lokalnej. Jeśli wszystkie kanały obsługiwane są identycznym opakowaniem zaprojektowanym dla najtrudniejszego przypadku, część rynku korzysta z nadmiernego marginesu bezpieczeństwa.

Rezerwy logistyczne mogą wynikać również z **poprawy infrastruktury**. Nowocześniejsze magazyny, dopasowanie do warunków klimatycznych, bardziej stabilny transport i sprawniejsze zarządzanie zapasami zmniejszają ryzyko, które kiedyś uzasadniały cięższe opakowania.

Największym problemem jest to, że wiele firm **nie mierzy rzeczywistych warunków logistycznych**. Bez danych o czasie składowania, wilgotności, liczbie uszkodzeń czy przeciążeniach najbezpieczniej zakładać wariant pesymistyczny. Taki pesymizm przekłada się na papier.

Rozwiązaniem może być projektowanie scenariuszowe – inne klasy opakowań na potrzeby eksportu, inne do szybkiej rotacji i inne do sprzedaży internetowej. Nie każde pudełko musi być gotowe na najgorszy dzień roku. Proponowany cykl inteligentnej optymalizacji opakowań przedstawiono na rysunku 3.

### Jak te rezerwy znaleźć?

Rozpoznanie ukrytych rezerw nośności jest znacznie trudniejsze niż ich intuicyjne podejrzewanie. Fakt, że opakowanie „działa bez

problemów”, nie oznacza jeszcze, że zostało zoptymalizowane. Równie dobrze może oznaczać konstrukcję rozsądną, jak i przewymiarowaną. Aby odróżnić jedno od drugiego, potrzebne są metody systematyczne, oparte na danych i analizie technicznej. Wybrane narzędzia identyfikacji rezerw nośności zestawiono w tabeli 2.

Pierwszym krokiem są **testy porównawcze wariantów**. Skuteczność łączenia badań eksperymentalnych i analiz numerycznych została wykazana już we wcześniejszych pracach dotyczących wytrzymałości opakowań z tektury falistej [2]. Najprostsza droga polega na zestawieniu obecnej konstrukcji z wersjami lekko odchudzonymi materiałowo lub zmodyfikowanymi geometrycznie. Porównanie wyników ECT, BCT, zachowania w składowaniu i odporności transportowej pozwala ocenić, czy zapas bezpieczeństwa jest realnie wykorzystywany. Czasem niewielka redukcja gramatury nie powoduje praktycznie żadnej utraty funkcjonalności.

Drugim ważnym narzędziem jest **analiza historycznych reklamacji i uszkodzeń**. Jeśli przez długi czas nie występują problemy jakościowe mimo wymagających wolumenów sprzedaży, może to świadczyć o dobrze zaprojektowanym systemie, ale również o nadmiarowym zapasie. Szczególnie cenna jest analiza zależności: które produkty reklamowane są często, a które nigdy, mimo podobnych warunków logistycznych.

Coraz większą rolę odgrywa **modelowanie numeryczne**, zwłaszcza metoda elementów skończonych. Jednym z klasycznych podejść pozostają analityczne modele homogenizacyjne, które umożliwiają wyznaczanie parametrów zastępczych tektury i ich wykorzystanie w uproszczonych analizach MES [15]. Symulacje pozwalają obserwować rozkład naprężeń, deformacje ścian, pracę naroży i lokalne mechanizmy wyboczenia. Dzięki temu można zidentyfikować obszary konstrukcji wykorzystane intensywnie oraz te, które posiadają duży niewykorzystany potencjał. Model bywa latarką świecącą w miejsca niewidoczne dla samego testu końcowego.

Tabela 2. Narzędzia i metody identyfikacji ukrytych rezerw nośności

| Metoda                        | Koszt wdrożenia | Czas realizacji | Wiarygodność  |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Testy BCT/ECT                 | Średni          | Krótki          | Wysoka        |
| Modelowanie MES               | Średni          | Średni          | Wysoka        |
| Analiza danych reklamacyjnych | Niski           | Krótki          | Średnia       |
| Monitoring logistyki          | Średni          | Średni          | Wysoka        |
| AI / analityka predykcyjna    | Wysoki          | Średni          | Bardzo wysoka |

Bardzo skuteczne jest również **profilowanie warunków logistycznych**. Pomiar rzeczywistego czasu składowania, wysokości piętrzenia, temperatury, wilgotności, drgań transportowych oraz liczby przeładunków pozwala porównać scenariusz projektowy z realnym życiem opakowania. Nierzadko okazuje się, że rzeczywistość jest znacznie łagodniejsza niż założenia.

Nowoczesnym narzędziem staje się **sztuczna inteligencja i analiza danych**. Potencjał metod AI w predykcji wytrzymałości opakowań tekturowych oraz wspomaganie decyzji projektowych wykazano w pracy [6]. Algorytmy mogą wykrywać zależności między konstrukcją, parametrami materiału, typem klienta i liczbą problemów eksploatacyjnych. Potrafią również wskazywać produkty o największym potencjale optymalizacji, gdzie redukcja kosztu może być najbezpieczniejsza.

Nie można pomijać znaczenia **eksperymentów pilotażowych**. Wdrożenie lżejszego wariantu dla wybranego klienta, rynku lub kanału sprzedaży pozwala zebrać dane bez ryzyka obejmowania zmianą całego portfolio. To podejście jest małe w skali, lecz wielkie w wartości poznawczej.

Ważnym elementem jest także **dialog między działami**. Konstruktor, laboratorium, produkcja, logistyka i sprzedaż często posiadają fragmenty tej samej układanki. Rezerwy bywają ukryte nie tylko w pudełku, ale też w silosach organizacyjnych. Kluczowe jest, aby szukanie rezerw nie było polowaniem na oszczędność za wszelką cenę. Celem powinno być zrozumienie, gdzie zapas jest potrzebny, a gdzie wynika z braku aktualnej wiedzy. Tylko wtedy optymalizacja pozostaje odpowiedzialna. Najpierw trzeba zobaczyć, jak naprawdę pracuje opakowanie, dopiero potem decydować, ile papieru naprawdę potrzebuje.

### Jak wykorzystać bez ryzyka?

Odnalezienie ukrytych rezerw nośności to dopiero połowa sukcesu. Znacznie ważniejsze jest ich wykorzystanie w sposób kontrolowany, tak aby redukcja kosztów lub masy opakowania nie prowadziła do wzrostu reklamacji, uszkodzeń produktów, czy utraty zaufania klientów. Prawdziwa optymalizacja nie polega na odważnym cięciu, lecz na inteligentnym zarządzaniu ryzykiem. Trzy typowe strategie zwiększania efektywności opakowań pokazano na rysunku 4.

Najbardziej oczywistym kierunkiem jest **stopniowa redukcja gramatury papierów**. Jeśli analiza danych i testy wskazują stabilny zapas bezpieczeństwa, można rozważyć zastosowanie lżejszego linera, flutingu lub zmiany kombinacji warstw. Kluczowe znaczenie ma tu etapowość. Lepiej zdjąć kilka gramów i obserwować system niż od razu odchudzić konstrukcję do granic rozsądku. Przykładowe działania optymalizacyjne i ich spodziewane efekty przedstawiono w tabeli 3.

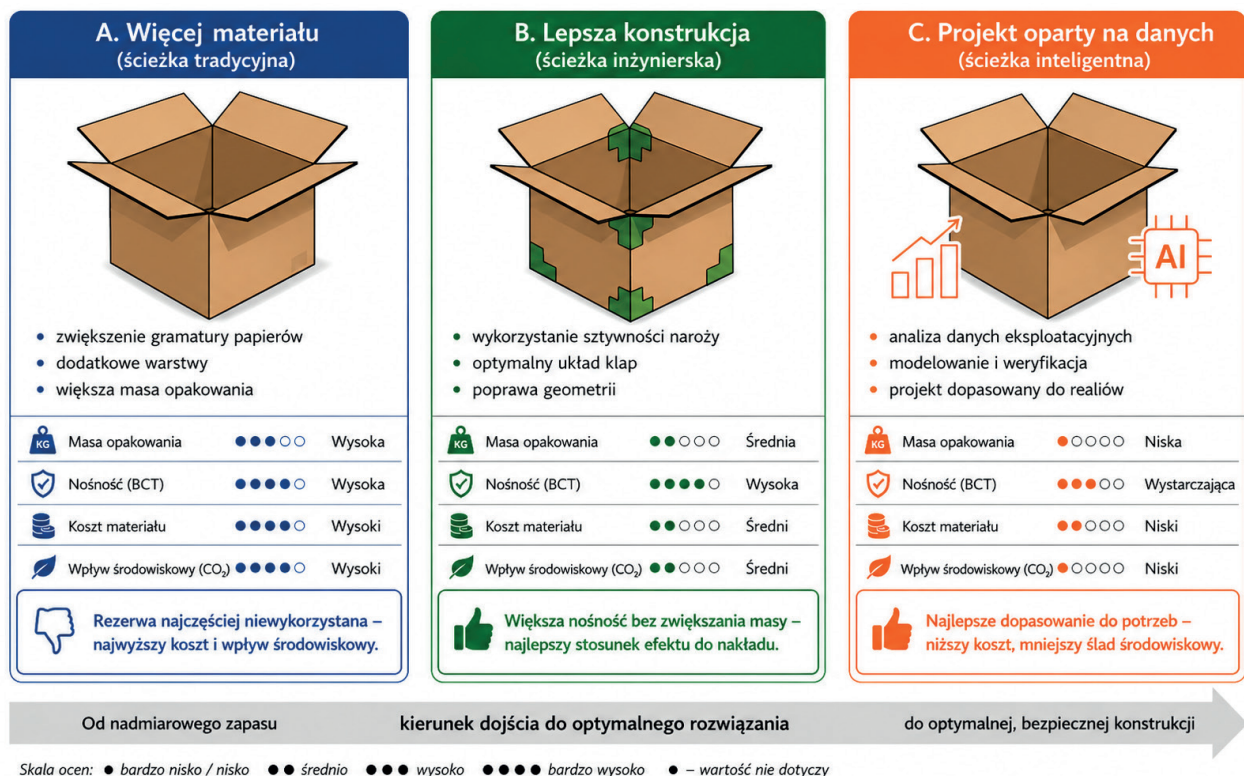
Tabela 3. Przykłady działań optymalizacyjnych oraz oczekiwane efekty wdrożenia

| Działanie optymalizacyjne      | Oczekiwany efekt                 |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Redukcja gramatury linera o 5% | Niższy koszt materiałowy         |
| Zmiana układu klap             | Wyższa sztywność pudełka         |
| Lepsze wykorzystanie naroży    | Większa nośność bez wzrostu masy |
| Segmentacja klientów           | Dopasowanie opakowania do ryzyka |
| Pilotaż lżejszej wersji        | Bezpieczna walidacja zmian       |

Drugą drogą jest **przeprojektowanie geometrii opakowania**. Przykładem efektywnego wykorzystania geometrii są również konstrukcje użytkowe wykonywane z pojedynczych arkuszy ciężkiej tektury falistej, w których nośność osiąga się głównie dzięki odpowiedniemu kształtowaniu formy [14]. Często podobną lub wyższą nośność można uzyskać nie poprzez cięższy materiał, lecz dzięki lepszemu wykorzystaniu naroży, zmianie proporcji pudełka, modyfikacji klap, lokalnym przetłoczeniom lub korzystniejszej orientacji fali. To rozwiązanie szczególnie atrakcyjne, ponieważ oszczędza surowiec bez osłabiania konstrukcyjnej inteligencji.

Bardzo skutecznym podejściem jest **segmentacja klientów i scenariuszy użytkowania**. Nie każdy odbiorca potrzebuje identycznego poziomu zabezpieczenia. Eksport dalekiego zasięgu, magazynowanie długoterminowe czy produkty wrażliwe wymagają większych marginesów niż szybka dystrybucja lokalna. Wprowadzenie kilku klas opakowań pozwala dopasować bezpieczeństwo do rzeczywistego ryzyka.

Kolejnym narzędziem jest **projektowanie scenariuszowe**. Zamiast tworzyć jedno pudełko na wszystkie możliwe warunki, można opracować warianty dla różnych tras, sezonów, kanałów sprzedaży lub poziomów obciążenia. To odejście od filozofii „jedna zbroja dla wszystkich”.



Rys. 4. Trzy drogi do zwiększenia efektywności opakowania z tektury falistej

Ważnym warunkiem bezpiecznej optymalizacji pozostaje **walidacja laboratoryjna i pilotaże rynkowe**. Każda zmiana materiałowa lub konstrukcyjna powinna zostać sprawdzona testami BCT, ECT, próbami transportowymi lub ograniczonym wdrożeniem u wybranych klientów. Dane z praktyki są najlepszym filtrem nadmiernego optymizmu.

Niezwykle istotny jest także **monitoring po wdrożeniu**. Nawet dobrze zaplanowana zmiana wymaga obserwacji wskaźników jakościowych: reklamacji, uszkodzeń, odrzuć produkcyjnych, zwrotów i opinii klientów. Optymalizacja nie kończy się w dniu wdrożenia, lecz zaczyna wtedy nowy etap kontroli.

Nie wolno zapominać o komunikacji z klientem. W wielu przypadkach lżejsze opakowanie może być odebrane pozytywnie jako działanie proekologiczne, pod warunkiem zachowania jakości. Jeśli jednak zmiana zostanie zauważona dopiero przy problemie, narrację przejmie reklamacja.

Największym błędem byłoby traktowanie każdej rezerwy jako zbędnego balastu. Część zapasu pełni rolę strategiczną – amortyzuje zmienność surowca, sezonowe warunki klimatyczne i ludzkie błędy w logistyce. Usunięcie wszystkiego, co „nie pracuje codziennie”, może sprawić, że konstrukcja nie poradzi sobie w dniu próby.

Rezerwy nośności są jak zapas paliwa w samolocie. Nie chodzi o to, by latać z pustymi zbiornikami, lecz by wiedzieć, ile naprawdę potrzeba na trasę. Sztuką jest nie przesada ani hazard, lecz precyzja.

### Gdzie nie wolno oszczędzać?

Optymalizacja opakowań jest działaniem racjonalnym, lecz nie może stać się dogmatem. Istnieją obszary, w których redukcja masy lub ograniczanie zapasu bezpieczeństwa może generować ryzyko niewspółmiernie większe niż potencjalna oszczędność materiałowa. Innymi słowy, są sytuacje, w których każdy zaoszczędzony gram może okazać się najdroższym gramem roku. Przykładową mapę ryzyka dla decyzji redukcyjnych przedstawiono na rysunku 5.

Pierwszym przykładem jest **eksport długodystansowy**. Opakowania przewożone przez wiele dni lub tygodni podlegają zmiennym warunkom klimatycznym, licznym przeładunkom, wibracjom oraz długiemu okresowi składowania. Im dłuższa droga i więcej nieznanych etapów, tym większa rola bezpiecznego marginesu. Wybrane scenariusze wysokiego ryzyka zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Sytuacje i warunki, w których redukcja zapasu jest szczególnie ryzykowna

| Scenariusz                    | Poziom ryzyka redukcji |
|-------------------------------|------------------------|
| Eksport długodystansowy       | Wysoki                 |
| Magazynowanie w wilgoci       | Wysoki                 |
| Produkty premium / delikatne  | Wysoki                 |
| Długie składowanie na palecie | Średni                 |
| Lokalna szybka dystrybucja    | Niski                  |

| CZYNNIK / SCENARIUSZ                                                                                                | POZIOM RYZYKA PRZY REDUKCJI ZAPASU |                            |                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
|                                                                                                                     | NISKI<br>(Akceptowalny)            | ŚREDNI<br>(Wymaga analizy) | WYSOKI<br>(Niewskazane redukcje) |
|  Ekspert morski / długie trasy     | ●                                  | ●                          | ●                                |
|  Wysoka wilgotność względna        | ●                                  | ●                          | ●                                |
|  Długie magazynowanie (> 6 mies.)  | ●                                  | ●                          | ●                                |
|  Produkty premium / wrażliwe       | ●                                  | ●                          | ●                                |
|  Dystrybucja krajowa, szybki obrót | ●                                  | ●                          | ●                                |
|  E-commerce, standardowe produkty  | ●                                  | ●                          | ●                                |

● Niskie ryzyko  
Redukcja zapasu możliwa i zwykle bezpieczna.

● Średnie ryzyko  
Redukcja możliwa po analizie danych, testach lub modelowaniu.

● Wysokie ryzyko  
Redukcja wymaga badań, weryfikacji i dodatkowych zabezpieczeń.

● Bardzo wysokie ryzyko  
Redukcja niewskazana ze względu na duże ryzyko uszkodzenia produktu.

 Mapa ma charakter orientacyjny. Ostateczna decyzja powinna być oparta na danych, testach i analizie rzeczywistych warunków łańcucha dostaw.

Rys. 5. Mapa ryzyka, wskazująca sytuacje, w których redukcja zapasu nośności może być niebezpieczna

Drugim obszarem są **środowiska o podwyższonej wilgotności**. Papier i tektura silnie reagują na wodę oraz zmiany wilgotności względnej. Istotny wpływ temperatury i wilgotności na parametry mechaniczne tektury został potwierdzony numerycznie w pracy [3]. Magazyny sezonowe, chłodnie, transport morski, regiony, w których panują trudne warunki klimatyczne, mogą znacząco obniżyć sztywność i nośność opakowań. Tam zapas bezpieczeństwa jest nie luksusem, lecz rozsądkiem.

Szczególne ostrożności należy zachować przy **produktach o wysokiej wartości jednostkowej**. Elektronika, kosmetyki premium, farmaceutyki, czy delikatne wyroby specjalistyczne często kosztują wielokrotnie więcej niż samo opakowanie. W takich przypadkach nawet niewielki wzrost ryzyka uszkodzenia może zniwelować wszystkie oszczędności materiałowe.

Kolejną kategorią są **produkty wrażliwe na deformacje i estetykę opakowania**. W handlu detalicznym oraz e-commerce wygląd pudełka wpływa na odbiór marki. Nawet jeśli zawartość pozostaje nienaruszona, zgnieciono naroża, zapadnięte ściany, czy słaba prezentacja mogą szkodzić wizerunkowi firmy.

Nie należy nadmiernie oszczędzać także tam, gdzie występuje **długotrwałe magazynowanie pod obciążeniem**. Jednostki paletowe przechowywane tygodniami lub miesiącami są narażone na pęcznienie materiału i stopniową utratę stateczności. Konstrukcja wystarczająca w teście chwilowym może okazać się zbyt słaba w czasie.

Wysokie ryzyko dotyczy również **niestabilnych procesów logistycznych**. Jeśli transport bywa chaotyczny, paletyzacja niespójna,

a obsługa ładunków agresywna, opakowanie musi przejmować część brakującej dyscypliny systemu.

Ostrożność jest wskazana także przy **zmiennym lub niejednorodnym surowcu**. Jeśli parametry papieru wykazują duże wahania między partiami, zbyt ciasna optymalizacja może szybko ujawnić się w jakości końcowej. Stabilność danych wejściowych warunkuje odwagę w redukcji zapasu.

W praktyce najlepsza strategia polega nie na uniwersalnym cięciu kosztów, lecz na różnicowaniu decyzji. Są produkty, dla których ważniejszy jest spokojny sen działu jakości. Oszczędzanie na opakowaniu przypomina regulację hamulców w samochodzie. W codziennej jeździe można nie zauważyć różnicy, dopóki nie nadejdzie moment nagłego hamowania. Właśnie dlatego są miejsca, gdzie margines bezpieczeństwa pozostaje wart swojej ceny.

## Wnioski

Opakowania z tektury falistej od lat projektowane są z odpowiednim zapasem bezpieczeństwa, który ma chronić produkt przed zmiennością materiału, niepewnością warunków logistycznych oraz skutkami błędów eksploatacyjnych. Jest to podejście uzasadnione i potrzebne. Jednocześnie analiza praktyki przemysłowej pokazuje, że część tego zapasu może przyjmować formę niewidzialnych rezerw nośności, które nie zawsze są świadomie zarządzane. Źródła takich rezerw są zróżnicowane. Mogą wynikać z przewymiarowanych gramatur papierów, konserwatywnych

metod projektowania, niedostatecznego wykorzystania geometrii konstrukcji, historycznych standardów firmowych lub zawyżonych scenariuszy logistycznych. W wielu przypadkach obecna konstrukcja opakowania jest nie tylko wynikiem obliczeń technicznych, lecz także zapisem dawnych decyzji i dawnych obaw.

Nowoczesne narzędzia inżynierskie umożliwiają coraz dokładniejsze rozpoznawanie rzeczywistych potrzeb wytrzymałościowych. Aktualny przegląd metod modelowania tektury falistej wskazuje na szybki rozwój homogenizacji numerycznej, symulacji MES oraz narzędzi cyfrowych wspierających projektowanie [9]. Testy porównawcze, analiza reklamacji, modelowanie numeryczne, monitoring łańcucha dostaw oraz systemy oparte na sztucznej inteligencji pozwalają odróżniać zapas potrzebny od zapasu przypadkowego. Sztuczna inteligencja może stać się jednym z głównych narzędzi przyszłej optymalizacji produkcji tektury falistej i procesów decyzyjnych w branży [7]. Dzięki temu możliwa staje się optymalizacja oparta na wiedzy, a nie wyłącznie na intuicji.

Wykorzystanie rezerw powinno jednak odbywać się ostrożnie. Redukcja masy opakowania bez właściwej walidacji może prowadzić do wzrostu reklamacji, strat produktowych oraz kosztów ukrytych przewyższających oszczędności materiałowe. Szczegółnej ostrożności wymagają zastosowania eksportowe, środowiska wilgotne, produkty wysokiej wartości oraz długotrwale magazynowanie.

Najbardziej racjonalnym kierunkiem rozwoju jest zarządzanie poziomem bezpieczeństwa w sposób zróżnicowany. Nie każde opakowanie potrzebuje tego samego marginesu, tak jak nie każdy produkt odbywa tę samą drogę logistyczną. Personalizacja konstrukcji pod rzeczywisty scenariusz użytkowania staje się jednym z najważniejszych trendów nowoczesnego opakowalnictwa.

Można więc stwierdzić, że niewidzialne rezerwy nośności są formą kapitału ukrytego w opakowaniu. Część warto zachować, część można odzyskać, a częścią należy nauczyć się świadomie zarządzać. Najtańszy papier to nie zawsze papier najcieńszy, lecz najlepiej dobrany do zadania.

Przyszłość branży będzie należała nie do tych, którzy zużywają najmniej materiału za wszelką cenę, lecz do tych, którzy najlepiej zrozumieją, gdzie materiał naprawdę pracuje.

Artykuł recenzowany

#### LITERATURA

- [1] Biancolini M.E. 2005. "Evaluation of equivalent stiffness properties of corrugated board". *Composite Structures* 69 (3) : 322-328. DOI: 10.1016/j.compstruct.2004.07.014.
- [2] Biancolini M.E., Brutti C. 2003. "Numerical and experimental investigation of the strength of corrugated board packages". *Packaging Technology and Science* 16 (2) : 47-60. DOI: 10.1002/pts.609.
- [3] Cornaggia A., Gajewski T., Knitter-Piątkowska A., Garbowski T. 2023. "Influence of humidity and temperature on mechanical properties of corrugated board – numerical investigation". *BioResources* 18 (4) : 7490-7509. DOI: 10.15376/biores.18.4.7490-7509.
- [4] Di Russo F., Desole M., Gisario A., Genovesi A., Barletta M. 2024. "Study and design of corrugated cardboard trays with microwaves by experimental analysis (EA) and finite element methods (FEM)". *Packaging Technology and Science* 37 (9) : 857-874. DOI: 10.1002/pts.2827.
- [5] Frank B. 2014. "Corrugated Box Compression – A Literature Survey". *Packaging Technology and Science* 27 (2) : 105-128. DOI: 10.1002/pts.2019.
- [6] Gajewski T., Grabski J.K., Cornaggia A., Garbowski T. 2024. "On the use of artificial intelligence in predicting the compressive strength of various cardboard packaging". *Packaging Technology and Science* 37 (2) : 97-105. DOI: 10.1002/pts.2783.
- [7] Garbowski T. 2024. "Revolutionizing corrugated board production and optimization with artificial intelligence". *BioResources* 19 (2) : 2003-2006. DOI: 10.15376/biores.19.2.2003-2006.
- [8] Garbowski T. 2025. "Exploring the future of novel flute shapes and their mechanical benefits". *BioResources* 20 (2) : 2483-2486. DOI: 10.15376/biores.20.2.2483-2486.
- [9] Garbowski T. 2025. "Review on Numerical Homogenization of Corrugated Materials. State-of-the-art in Modeling of Corrugated Board". *BioResources* 20 (2) : 5157-5184. DOI: 10.15376/biores.20.2.Garbowski.
- [10] Garbowski T., Borecki P. 2024. "Analysis of the impact of futuristic corrugated layer shape on mechanical properties and cost of single-wall corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 80 (11) : 271-277. DOI: 10.15199/54.2024.11.1.
- [11] Garbowski T., Gajewski T. 2021. "Determination of transverse shear stiffness of sandwich panels with a corrugated core by numerical homogenization". *Materials* 14 (8) : 1976. DOI: 10.3390/ma14081976.
- [12] Garbowski T., Knitter-Piątkowska A. 2022. "Analytical determination of the bending stiffness of a five-layer corrugated cardboard with imperfections". *Materials* 15 (2) : 663. DOI: 10.3390/ma15020663.
- [13] Jamsari M.A., Kueh C., Gray-Stuart E.M., Dahm K., Bronlund J.E. 2019. "Experimental and numerical performance of corrugated fibreboard at different orientations under four-point bending test". *Packaging Technology Science* 32 (11) : 555-565. DOI: 10.1002/pts.2471.
- [14] Suarez B., Muneta M.L., Sanz-Bobi J.D., Romero G. 2021. "Efficient Design of Thin Wall Seating Made of a Single Piece of Heavy-Duty Corrugated Cardboard". *Materials Testing* 14 (21) : 6645. DOI: 10.3390/ma14216645.
- [15] Talbi N., Batti A., Ayad R., Guo Y.Q. 2009. "An analytical homogenization model for finite element modeling of corrugated cardboard". *Composite Structures* 88 (2) : 280-289. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.04.0080.